

2019 年度 風工学研究拠点 共同研究成果報告書

研究分野：屋外環境
研究期間：2019 年度
課題番号：19192016
研究課題名（和文）：格子ボルツマン法に基づく街区・建物スケール LES の実用化手法の開発
研究課題名（英文）：Development of a practical application technique of LES for city-block and building scales based on lattice Boltzmann method
研究代表者：飯塚 悟
交付決定額（当該年度）：250,000 円

1. はじめに

(1) 研究の背景

地球スケールを出発点とし、段階的な空間詳細化を施して温暖化予測を行う「温暖化ダウンスケーリングシミュレーション」は、地球温暖化や都市ヒートアイランドの実態解析や将来予測、それらの影響評価、緩和策・適応策の検討において有効な手段となる。現在取り組まれている温暖化ダウンスケーリングシミュレーションの多くは都市スケールまでの空間詳細化であるが、現実的かつ具体的な緩和策・適応策を検討する場合は特に、人間の生活空間に近接する街区・建物スケールまでの詳細なダウンスケーリングシミュレーションが必要となる。そのような詳細なダウンスケーリングシミュレーションを行うためには、気象モデルと工学 CFD (Computational Fluid Dynamics) モデル（本研究では LES (Large-Eddy Simulation) の適用を前提）をシームレスに結合する必要がある。その結合において最も大きな課題となるのが、LES の流入境界条件として必要となる風速変動成分（以下、流入変動風）の適切な生成である。

(2) 研究の目的

LES のための流入変動風の生成手法は、①別途あるいは同時の流体計算に基づいて生成する手法、②目標とする乱流統計量を満たすように人工的に生成する手法、の 2 つに大別される。①の流体計算に基づいて生成する流入変動風は、流体の支配方程式（連続式と運動方程式）を満たす一方、その計算手法の精度により目標とする乱流統計量を必ずしも満足できないという欠点を持つ。これに対し、②の人工的に生成する流入変動風は、目標とする乱流統計量を精度良く再現できる一方、通常、流入直後に無視し得ない非物理的な乱れの減衰が生じる問題点を持つ。その非物理的な乱れの減衰は、人工的に生成する流入変動風が流体の支配方程式を必ずしも満足していないことに起因している。

流体計算手法の 1 つである格子ボルツマン法 (LBM (Lattice Boltzmann Method)) は、流体を多数の仮想粒子の集合体と捉え、各粒子の衝突と並進を通じて全体の流れ場を再現する手法であり、流体の支配方程式を陽には解かない。そのため、格子ボルツマン法に基づく LES を用いれば、人工的に生成する流入変動風を導入した場合でも流入直後の非物理的な乱れの減衰を回避もしくは緩和できる可能性を持つ。その可能性の検討、すなわち、格子ボルツマン法に基づく LES (街区・建物スケール LES) と人工的に生成する流入変動風の組み合わせの有効性を定量的に検討することが本研究の目的である。

2. 研究の方法

本研究では、単純形状の建物群を配置したモデル街区^{文1)} (図 1、図 2 参照) の気流解析を対象とし、格子ボルツマン法に基づく LES と人工的に生成する流入変動風の組み合わせの是非について、有限差分法 (FDM (Finite Difference Method)) に基づく LES に人工的な流入変動風を導入した場合との比較を通じて定量的に明らかにした。

まず、精度検証用データと流入変動風生成の際に必要な乱流統計量を作成するため、解析対象の主流 (x_1) 方向と主流横断 (x_2) 方向に対して周期境界条件 (PBC (Periodic Boundary Conditions)) を課した有限差分法に基づく LES (以下、PBC) を行った (図 1 参照)。流入変動風生成の際に必要な乱流統計量は、PBC の $x_1/H = 6$ (解析領域の主流 (x_1) 方向中心位置、 H : 建物高さ) における鉛直 (x_2 - x_3) 断面のサンプリングデータ (瞬時風速 3 成分データ) を用いて算出した。本研究で用いた流入変動風は、人工的な生成手法の 1 つである Reynolds 応力

のコレスキー分解と2次元デジタルフィルタに基づく手法^{文2)~文5)}(Xieらのオリジナルの手法^{文2)}に対して、研究代表者ら^{文3)}が提案した改良型)を導入し生成した。

次に、人工的に生成した流入変動風を用いて、単純形状の建物群を配置したモデル街区の気流解析を対象として、有限差分法に基づくLES(以下、FDM-LES)と格子ボルツマン法に基づくLES(以下、LBM-LES)を実施し(図2参照)、結果の比較を行った。表1は各ケースの解析領域の大きさとメッシュ分割数、表2は各ケースの解析条件を示したものである。

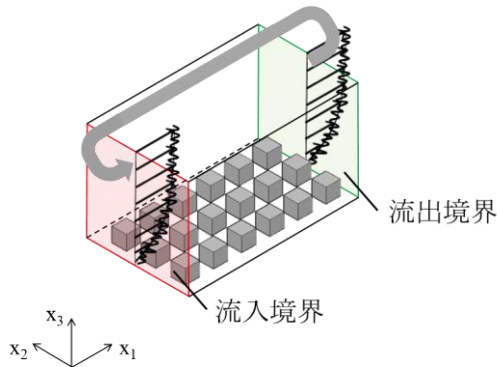


図1 PBC解析モデル

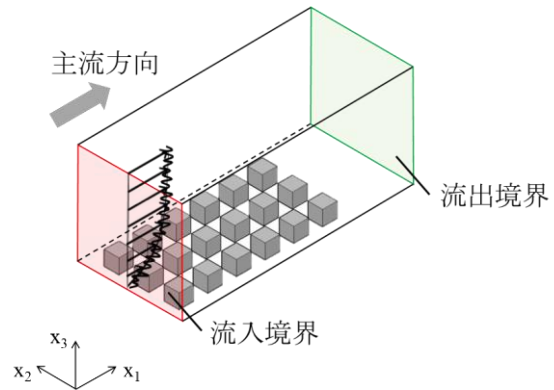


図2 FDM-LES / LBM-LES解析モデル

表1 解析ケース

ケース名	解析領域の大きさ	メッシュ分割数
PBC	$12H(x_1) \times 6.4H(x_2) \times 6.4H(x_3)$	$120(x_1) \times 64(x_2) \times 64(x_3)$
FDM-LES	$16H(x_1) \times 6.4H(x_2) \times 6.4H(x_3)$	$160(x_1) \times 64(x_2) \times 64(x_3)$
LBM-LES	$16H(x_1) \times 6.4H(x_2) \times 6.4H(x_3)$	$160(x_1) \times 64(x_2) \times 64(x_3)$

表2 解析条件

	PBC	FDM-LES	LBM-LES
Reynolds数	10000 ($Re = UH / \nu$)		
SGSモデル	標準 Smagorinsky モデル ($C_s = 0.12$)		
時間スキーム	2次精度 Adams-Bashforth 法 + Crank-Nicolson 法		2次精度陽解法相当
空間スキーム	2次精度中心差分 (LBM-LES も 2次精度中心差分相当)		
駆動力	せん断駆動		
流入境界条件	周期境界条件	人工的に生成した流入変動風	
流出境界条件	周期境界条件	勾配0条件	
側面境界条件	周期境界条件		
上空境界条件	スリップ壁条件		
固体面(地表面・建物壁面)境界条件	linear-power law 型 2層モデル		bounce-back 条件

3. 研究成果

(1) 生成した流入変動風の性状

図3、図4はそれぞれ、主流(x_1)方向平均風速 $\langle \bar{u}_1 \rangle / U$ と乱流エネルギー k / U^2 の鉛直分布について、目標とするPBCの結果とFDM-LES/LBM-LES用に人工的に生成した流入変動風の性状を比較したものである。人工的に生成した流入変動風は、平均風速と乱流エネルギーともにPBCの結果と良く一致している。

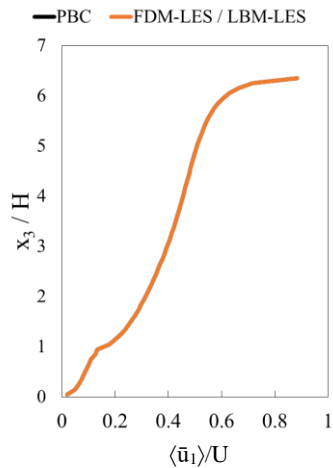


図3 主流方向平均風速の鉛直分布

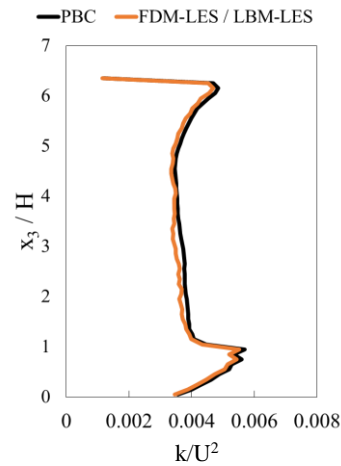


図4 乱流エネルギーの鉛直分布

(2) 流入変動風の流入直後の性状

図5、図6はそれぞれ、流入境界面付近の $x_1/H=0.05$ における主流 (x_1) 方向平均風速 $\langle \bar{u}_1 \rangle / U$ と乱流エネルギー k/U^2 の鉛直分布について、FDM-LES および LBM-LES の結果と PBC の結果を比較したものである (図6では一部、流入境界面 ($x_1/H=0.0$) の結果も表示)。3者の風速分布の結果は良く一致しているが、3者の乱流エネルギー分布の間には差異が見られている。

乱流エネルギーに関して、建物上空の $1.1 \leq x_3/H \leq 6.2$ の範囲で平均すると、FDM-LES の結果は PBC の結果よりも 15.2% 減少している。このような非物理的な乱れの減衰は、人工的に生成される流入変動風が流体の支配方程式を必ずしも満足していないことに伴って、言い換えると、流入直後に支配方程式を満足させるための速度・圧力修正に伴って生じている。一方、LBM-LES では、建物上空の同じ $1.1 \leq x_3/H \leq 6.2$ の範囲の平均値が PBC の結果よりも 23.3% 減少している。つまり、FDM-LES よりも流入直後の乱れの減衰は悪化している。ただし、LBM-LES における乱れの減衰は、流入境界面において既に流入変動風の乱流エネルギーが減衰してしまっていることにも起因している。LBM-LES 用に生成した流入変動風の性状は、図3、図4に示すとおりであるが、その流入変動風を LBM-LES で用いる場合、粒子数密度の分布関数として与えられる。その際、粒子の並進過程で粒子速度ベクトルによっては解析領域に流入しない粒子数密度の分布関数が出現する。その結果として、LBM-LES で与えられる流入変動風は、流入境界面において既に、目標値から外れたものとなってしまっている。

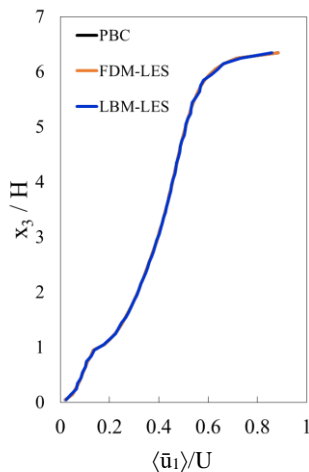


図5 主流方向平均風速の鉛直分布

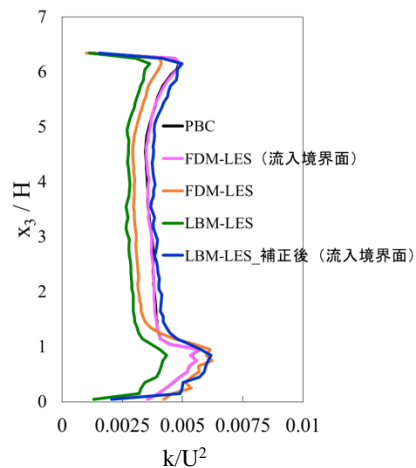


図6 乱流エネルギーの鉛直分布

そこで、LBM-LES の流入境界面で与えられる流入変動風の乱流エネルギーの値が目標とする PBC の値と同程度となるように、LBM-LES で用いる流入変動風に対して補正 (乱れの上乗せ) を行った (図6参照)。以下の (3) に示す LBM-LES の結果は、補正した流入変動風を用いた場合の結果である。

(3) 流入変動風の流下性状

図7、図8は、 $x_1/H = 2.0, 6.0, 10.0$ ($x_1/H = 0.0$ が流入境界面)における乱流エネルギー k/U^2 の鉛直分布について、FDM-LES、LBM-LESそれぞれの結果とPBCの結果を比較したものである。FDM-LES、LBM-LESの結果ともに、流下するにつれて乱流エネルギーが減衰していることが見て取れる。LBM-LESの方がFDM-LESよりもその減衰度合いが大きく、特に、建物高さよりも低い領域 ($x_3/H < 1.0$) で減衰が顕著となっている。LBM-LESでは、固体面(地表面と建物壁面)境界条件として bounce-back 条件が通常用いられ、本研究でも同条件を使用している。bounce-back 条件は no-slip 条件 (linear-law) に相当するものであるが、本解析条件のように、比較的高い Reynolds 数流れを対象として固体面近傍で十分細かいメッシュを用いていない場合、同条件は適切に機能しない。このような条件設定が乱れの減衰を悪化させていると考えられ、今後、LBM-LES 用の新たな固体面境界条件 (壁関数) の開発が必要となる。LBM-LES では、以上のような建物高さよりも低い領域 ($x_3/H < 1.0$) における乱れの減衰も建物上空の乱れ性状に悪影響を及ぼしていると考えられる (図6)。

表4は、式(1)で算出した乱流エネルギーの減衰率(建物上空の $1.1 \leq x_3/H \leq 6.2$ の範囲の平均値として算出)を示したものである。式(1)において、 $TKE_{x_1/H=0.0}(x_3)$ は $x_1/H = 0.0$ (流入境界面)における乱流エネルギーの値、 $TKE(x_3)$ は $x_1/H = 2.0, 6.0, 10.0$ における乱流エネルギーの値を代入している。

$$\text{減衰率 (\%)} = \frac{TKE_{x_1/H=0.0}(x_3) - TKE(x_3)}{TKE_{x_1/H=0.0}(x_3)} \times 100 (\%) \quad (1)$$

FDM-LES の場合、 $x_1/H = 2.0, 6.0, 10.0$ における乱流エネルギーの減衰率はそれぞれ 17.7%、22.6%、25.2%となっている。一方、LBM-LES の場合の同減衰率はそれぞれ 26.0%、37.5%、38.7%であり、FDM-LES よりも乱れの減衰度合いが大きい。上述したように、今後、LBM-LES 用の新たな固体面境界条件の開発を行い、その導入効果を検討していきたいと考えている。なお、今回の解析で統計量算出までに要した CPU 時間は、FDM-LES が 219207 秒、LBM-LES が 5866 秒であり、計算負荷は LBM-LES の方が圧倒的に小さい。

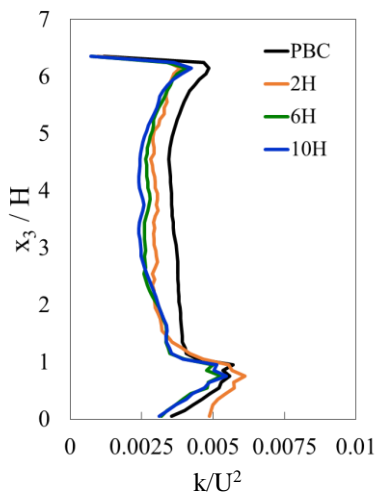


図7 FDM-LESにおける乱流エネルギーの鉛直分布

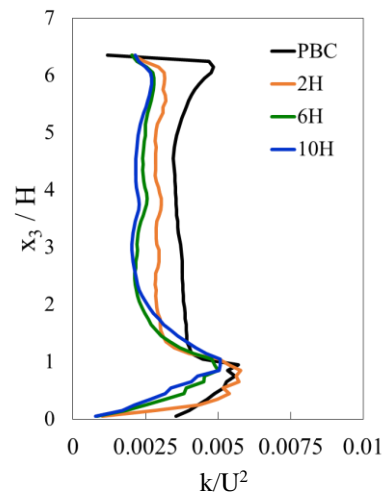


図8 LBM-LESにおける乱流エネルギーの鉛直分布

表 4 乱流エネルギーの減衰率

ケース名	減衰率 (%)		
	$x_1/H = 2.0$	$x_1/H = 6.0$	$x_1/H = 8.0$
FDM-LES	17.7	22.6	25.2
LBM-LES	26.0	37.5	38.7

4. 主な発表論文等

なし

5. 研究組織

(1) 研究代表者

飯塚 悟 (名古屋大学・大学院環境学研究科・准教授)

(2) 研究分担者

玄 英麗 (東京工芸大学・工学部建築学科・助教)

原 政之 (埼玉県環境科学国際センター・研究員)

【参考文献】

- 文1) Kanda, M., Large-eddy simulation on the effects of surface geometry of building arrays on turbulent organized structures. *Boundary-Layer Meteorology*, 118 (2006), pp.151-168.
- 文2) Xie, Z. and Castro, I. P., Efficient generation of inflow conditions for large eddy simulation of street-scale flows. *Flow, Turbulence and Combustion*, 81(3) (2008), pp.449-470.
- 文3) 近藤亮彦, 飯塚悟, 気象モデルと工学LESモデルのシームレスな結合手法の開発(その1) Reynolds 応力のコレスキー分解に基づく人工的な LES 流入変動風生成手法の検討. *日本建築学会環境系論文集*, 77(678) (2012), pp.661-669.
- 文4) 飯塚悟, 玄英麗, 気象モデルと工学 LES モデルのシームレスな結合手法の開発 (その2) 人工的な LES 流入変動風に対する連続条件の課し方の提案と平板境界層流解析への適用. *日本建築学会環境系論文集*, 81(727) (2016), pp.811-817.
- 文5) Xuan, Y. and Iizuka, S., Effects of imposing the continuity condition on artificially generated inflow turbulence for LES. *Proceedings of the 6th International Symposium on Computational Wind Engineering* (2014), 8pp.

格子ボルツマン法に基づく街区・建物スケール LES の実用化手法の開発

飯塚 悟 (名古屋大学)

内容：

本研究では、単純形状の建物群を配置したモデル街区の気流解析 (図 1 参照) を対象とし、格子ボルツマン法に基づく LES (LBM-LES) と人工的に生成する流入変動風の組み合わせの是非について、有限差分法に基づく LES (FDM-LES) に人工的な流入変動風を導入した場合との比較を通じて定量的に明らかにした。

流入境界面付近の $x_1/H = 0.05$ における乱流エネルギーの鉛直分布 (図 2) に関して、建物上空の $1.1 \leq x_3/H \leq 6.2$ の範囲で平均すると、FDM-LES の結果は PBC (主流 (x_1) 方向と主流横断 (x_2) 方向に周期境界条件を課した有限差分法に基づく LES) の結果よりも 15.2% 減少している。このような非物理的な乱れの減衰は、人工的に生成される流入変動風が流体の支配方程式を必ずしも満足していないことに伴って、言い換えると、流入直後に支配方程式を満足させるための速度・圧力修正に伴って生じている。一方、LBM-LES では、建物上空の同じ $1.1 \leq x_3/H \leq 6.2$ の範囲の平均値が PBC の結果よりも 23.3% 減少している。つまり、FDM-LES よりも流入直後の乱れの減衰は悪化している。ただし、LBM-LES における乱れの減衰は、流入境界面において既に流入変動風の乱流エネルギーが減衰してしまっていることにも起因している。LBM-LES で流入変動風を用いる場合、粒子数密度の分布関数として与えられる。その際、粒子の並進過程で粒子速度ベクトルによっては解析領域に流入しない粒子数密度の分布関数が出現する。その結果として、LBM-LES で与えられる流入変動風は、流入境界面において既に、目標値から外れたものとなっている。

そこで、LBM-LES の流入境界面で与えられる流入変動風の乱流エネルギーの値が目標とする PBC の値と同程度となるように、LBM-LES で用いる流入変動風に対して補正 (乱れの上乗せ) を行い、流入変動風の流下性状に関して、FDM-LES と LBM-LES の結果の比較を行った。 $x_1/H = 2.0, 6.0, 10.0$ ($x_1/H = 0.0$ が流入境界面) における乱流エネルギーの鉛直分布を比較すると (図省略)、LBM-LES の方が FDM-LES よりも乱流エネルギーの減衰度合いが大きく、特に、建物高さよりも低い領域 ($x_3/H < 1.0$) で減衰が顕著となっている。LBM-LES の場合、固体面 (地表面と建物壁面) 境界条件として用いている bounce-back 条件が乱れの減衰を悪化させていると考えられており、今後、LBM-LES 用の新たな固体面境界条件 (壁関数) の開発を行い、その導入効果を検討していく予定である。なお、今回の解析で統計量算出までに要した CPU 時間は、FDM-LES が 219207 秒、LBM-LES が 5866 秒であり、計算負荷は LBM-LES の方が圧倒的に小さい。

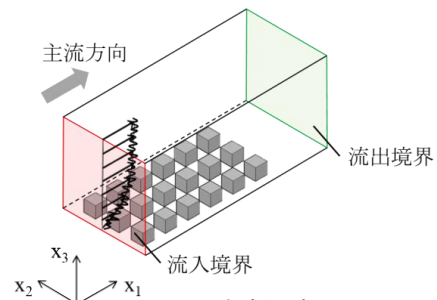


図 1 解析対象

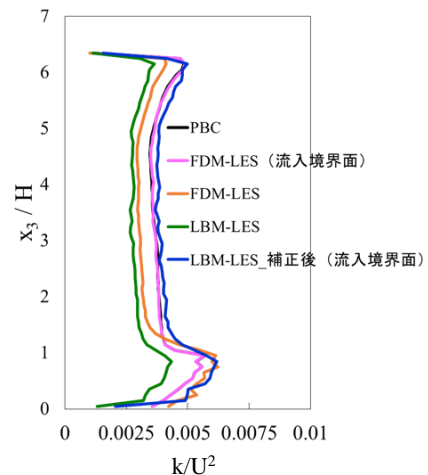


図 2 乱流エネルギーの鉛直分布 ($x_1/H = 0.05$)